

暑熱環境における無効発汗を考慮した人体平均皮膚表面温度の予測

PREDICTION OF MEAN SKIN TEMPERATURE FOR PEOPLE IN HOT ENVIRONMENT
CONSIDERING EVAPORATING EFFICIENCY OF SWEATING窪田 英樹*¹, 山越 健弘*², 鎌田 紀彦*³朝比奈 亮*⁴, 浜田 博之*⁵, 若松 伸司*⁶

Hideki KUBOTA, Takehiro YAMAKOSHI, Norihiko KAMATA,

Ryo ASAHINA, Hiroyuki HAMADA and Shinji WAKAMATSU

An empirical equation for the evaporative efficiency of sweating was derived as a function of wetted skin surface area. By applying this equation and the linear relationship between the mean skin temperature and sweating rate reported in our previous paper, into the heat balance equation on human subject, a simple equation for predicting the mean skin temperature was introduced as a function of four environmental factors and one human factor (metabolic rate). This predicted mean skin temperature could be used as an index for evaluating human response to hot environment. In this paper, we presented the results of mean skin temperature calculated for two typical cases on psychometric charts. These results demonstrate that we need to take into account the evaporating efficiency of sweating for evaluating hot environment for people who are in moving conditions and/or critical hot environments.

Keywords : sweat, evaporative efficiency of sweating, mean skin temperature, thermal environment, wettedness, ergometer,

発汗、有効発汗率、平均皮膚表面温度、温熱環境、濡れ率、エルゴメータ

1 はじめに

暑熱環境を的確に評価することは、発熱のある屋内の作業環境はいまでもなく、夏期に頻発する熱中症に象徴されるように日常生活においても対応が迫られている大きな課題といえる。地球の温暖化やヒートアイランド現象が大きな問題となっているが、その影響が懸念される暑熱環境に対しては、環境安全の観点からも、信頼のおける簡便な評価指標の構築が望まれている。本論文は、人体の温熱的な状態を表す代表的生理量の一つである平均皮膚表面温度(以下、平均皮温)に着目して、有効発汗率(無効発汗)を考慮した簡便な予測式を提示しようと試みたものである。この式で予測される平均皮温はそのまま評価指標として利用することが可能と考えられる。

さて、暑い環境の下では発汗特性を適切に把握することが要求される。温熱性の発汗に加えて、歩行や作業時、あるいはスポーツなどの運動時には、中立温感の状態でも発汗する、いわゆる運動性の発汗を考慮する必要がある¹⁾。さらに、本論文が対象とする比較的厳しい暑熱環境において特に留意すべきことは、発汗による濡れ率がある値を越えると、発汗した汗の一部が人体の表面で蒸発しないで滴り落ちる現象、すなわち、人体を冷やす役割を果たさずに失われる無効発汗が発生することである。

したがって、暑熱環境を評価するためには、人体を冷やすのに寄与する有効発汗率^{2~4)}の特性を把握し、それを評価に反映させることが不可欠である。例えば高温作業環境などの安全性を評価対象とする際、許容限界近域の温域では無効発汗が発生する可能性が高く、これを無視することは危険側に評価することになるので特に重要と考えられる。

暑熱環境に関する温熱環境評価指標として既に多くのものが示されている。まず、Wet Bulb Globe Temperature (WBGT, ISO 7243⁵⁾, 1989)に代表される物理的環境指標がある。しかし、これらの物理指標値と人体の状態との間には直接的な関係はない。被験者実験を基にして、これらの物理量と人体の生理的・心理的状态とを関係づけた指標に有効温度⁶⁾やP4SR⁷⁾などがある。しかし、これらの指標はBeldingらがHeat Stress Index (HSI)を提案する論文⁸⁾においても指摘しているように、その適用範囲は実験条件に限定される。この限界を克服すべく理論的な指標が提案されている。一つは、いわば人体に関する「仮想負荷」を導入した指標であり、HSI, Required Sweat Rate (SW_{req}, ISO 7933⁹⁾, 1989), Predicted Heat Strain¹⁰⁾ (PHS, ISO/CD 7933:改訂 ISO 7933, 2000)などが挙げられる。HSI, SW_{req}, PHSの「仮想負荷」は必要発汗量である。これらの指標の特徴は、「仮想負荷」を算定する際に未知量のはずの平均皮温を既知量扱

*¹ 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授・工博*² 福井大学大学院工学研究科システム設計工学専攻
大学院生・工修*³ 室蘭工業大学建設システム工学科 助教授・工博*⁴ 千歳市役所 工修*⁵ 旭川市消防署 工修*⁶ 独立行政法人国立環境研究所 PM2.5DEP 研究プロジェクト
プロジェクトリーダー・工博Prof., Division of Urban and Environmental Eng., Hokkaido University, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of System Design Eng., Graduate School of Engineering,
Hukui University, M. Eng.Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.
Chitose City, M. Eng.

Asahikawa City, M. Eng.

Project Leader, PM2.5 DEP Research Project, National Institute for Environmental
Studies, Dr. Eng.

いしていることである。この問題を克服し得る理論的指標に、人体の体温調節機能をモデル化した Gagge・Nishi¹¹⁾、Gagge・Berglund¹²⁾による Two-node model がある。ここでは、平均皮温、体内温度、発汗量などの生理量を、人体の体温調節機能モデルに基づいて、代謝量・着衣量と環境変数の関数として理論的に算定することができ、上述の諸指標が抱える問題点が克服されている。しかし、その有効性はモデルの適用性にあり、現在最も信頼されるとされる Two-node model についても、運動時の発汗量の扱い¹³⁾や指標の内容¹⁴⁻¹⁷⁾等、いくつかの課題や問題点が指摘されている。さらに、簡便な指標としての適性という観点からみると、連立微分方程式を解く必要があることが一つの難点と思われる。ここで、他の代表的指標・研究に触れると、Fanger による PMV^{1, 20)}は、「仮想の熱負荷」と「実験で得られた温感」とを結びつけたもので、平均皮温や発汗量などの生理量を反映させた指標ではない。すなわち、PMV は本質的には実験的な指標であり、その適用は、仮想熱負荷と温感とを結びつける際に基礎にした実験条件の範囲内に限られ、このような基本的特性を反映して PMV が同じ値でも平均皮温は着衣や風速によって異なる²¹⁾、などの問題点が指摘されている^{17, 18, 19)}。一方、暑熱環境に関する代表的な基礎研究に持田らの研究^{16, 17)}がある。平均皮温と濡れ率の温感への関わり等について実験に基づく分析がなされており、今後の指標化へ向けた成果が期待される。

しかしながら、上記の諸指標を含めて、これまでに知られている温熱環境評価指標には有効発汗率を考慮したものはみられないようである。

これらの既往の指標に対して、本論文は、人体の体温調節機能に関する筆者らのモデルに基づく指標を新たに提示しようとするものである。すなわち本論文において、①筆者らが既に報告した体温調節機能モデル^{21, 22)}を基礎にして、②有効発汗率に関する近似式を、既往の実験結果を基にして発汗濡れ率の関数として新たに導き、③最終的に、①と②を統合して、無効発汗が発生しているときの平均皮温、発汗量、発汗濡れ率などの予測式を、環境4要素と代謝率の陽関数として解析的に導く。これらは本研究で提示しようとする新たな論点であると同時に限界でもある。

筆者らのモデルは、定常状態に着目して、温熱性の発汗は平均皮温の関数で表現できる、とすることが基本となっている。すなわち、温熱性発汗は平均皮温とコア温度の関数であることがこれまでに知られているが^{23, 24)}、筆者らの平均皮温予測モデルは、人体の定常に近い状態に着目すれば、体内温度と平均皮温の影響を受ける温熱性の発汗量を、結果的に平均皮温の中立温感時の平均皮温からの偏差のみの関数として表現することが可能であることを実験で確認し、その特性を基礎にして構成したものである。筆者らは既報^{21, 22)}において、無効発汗が生じる温域に関しては Gagge・Berglund¹²⁾と同様に「濡れ率一定」とする近似的扱いをした。本報告では、有効発汗率を考慮した予測式を提示する。しかし、発汗濡れ率の関数とする有効発汗率の近似式は、既存の文献を参考にして導いたものであり、従って、平均皮温の予測式も、適用した既往研究の実験条件に制約されている。特に参考にしたデータは裸体に限定され、着衣の影響が不明である。しかしながら、今後明らかにされるであろう多様な条件下での有効発汗率の結果が、もし本論文で提示する形の式で近似できれば、本論文の結果がそのまま適用できる、という可能性を含んでいる。

なお、本論文においては、前報^{21, 22)}と同様、温熱性発汗が始まる温度から 36℃程度までの平均皮温範囲を対象とする。

2. 記号の説明

a_{sk} : 平均皮温 t_{sk} における飽和水蒸気圧 p_{sk} に関わる係数	kPa/K
$p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk}$ 、($a_{sk} = 0.270, 27 < t_{sk} < 37^{\circ}\text{C}$)	
a_{dr} : 有効発汗率 η_{sw} を w_{sw} の関数で近似するときの係数	ND
$\eta_{sw} = a_{dr} + b_{dr} / w_{sw}$	
A_{Du} : DuBois 面積	m ²
b_{sk} : 平均皮温 t_{sk} における飽和水蒸気圧 p_{sk} に関わる係数	kPa
$p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk}$ 、($b_{sk} = -3.83, 27 < t_{sk} < 37$)	
b_{dr} : 有効発汗率 η_{sw} を w_{sw} の関数で近似するときの係数	ND
$\eta_{sw} = a_{dr} + b_{dr} / w_{sw}$	
f_{eff} : 人体有効放射面積率	ND
h : 総合熱伝達率(= $h_c + h_{rop}$)	W/(m ² ·K)
h_c : 対流熱伝達率	W/(m ² ·K)
h_r : 放射熱伝達率	W/(m ² ·K)
h_{rop} : 作用放射熱伝達率 (= $f_{eff} \cdot h_r$)	W/(m ² ·K)
k_{adp} : 「暑気鍛練」による温熱性発汗割増し係数	ND
k_{diff} : 拡散による蒸発熱流率	W/(m ² ·kPa)
k_{Lres} : 呼吸による潜熱流率	W/(m ² ·kPa)
k_{max} : 濡れた皮膚表面からの蒸発熱流率	W/(m ² ·kPa)
k_{rc} : 放射と対流による熱流率	W/(m ² ·K)
k_{sres} : 呼吸による顕熱流率	W/(m ² ·K)
k_{swsk} : 平均皮温の上昇に起因する温熱性発汗による蒸発熱流率	W/(m ² ·K)
k_{swt} : 温熱性発汗による蒸発熱流率	W/(m ² ·K)
LR : ルイス数 (=16.5)	K/kPa
p_a : 周囲空気の水蒸気圧	kPa
p_{ex} : 呼気の水蒸気圧	kPa
p_{sk} : 平均皮膚表面温度の飽和水蒸気圧	kPa
q_c : 対流による熱流密度	W/m ²
q_{dir} : 拡散による蒸発熱流密度	W/m ²
q_{dr} : 人体の外に滴下した汗の等価蒸発熱流密度	W/m ²
q_{Hl} : 人体発生熱流密度 (= $q_M - q_{wk} = q_M (1 - \xi)$)	W/m ²
q_{Lres} : 呼吸による蒸発熱流密度	W/m ²
q_{max} : 濡れた人体表面からの蒸発による熱流密度	W/m ²
q_M : 代謝密度	W/m ²
q_r : 放射による熱流密度	W/m ²
q_{sres} : 呼吸による顕熱流密度	W/m ²
q_{sun} : 日射受熱熱流密度	W/m ²
q_{sw} : 発汗による蒸発熱流密度(= $q_{swe} + q_{swt}$)	W/m ²
q_{swcr} : 体内温度が上昇する温域における体内温度上昇に起因する温熱性発汗による蒸発熱流密度	W/m ²
q_{swe} : 中立温感時の運動性発汗による蒸発熱流密度	W/m ²
q_{swcr} : 有効発汗蒸発熱流密度	W/m ²
q_{swsk} : 体内温度がほぼ一定に保たれる温域における温熱性発汗による蒸発熱流密度	W/m ²
q_{swt} : 温熱性発汗による蒸発熱流密度(q_{swsk} と q_{swcr})	W/m ²
q_{wk} : 外部仕事量密度	W/m ²
R_s : 人体の表面熱伝達抵抗	(K·m ²)/W
R_{se} : 人体の表面湿気伝達抵抗	(kPa·m ²)/W
t_a : 人体周辺の気温	℃

- t_{ex} : 呼気温度 ℃
- t_{op} : 作用温度 $\{=(h_{rtp} t_{rtp} + h_c t_a)/(h_{rtp} + h_c)\}$ ℃
- t_{rtp} : 作用放射温度 ℃
- t_{sk} : 平均皮膚表面温度(平均皮温と略記) ℃
- t_{skcr} : 式(3)の適用上限平均皮膚表面温度 ℃
- t_{skn} : 中立温感時の平均皮膚表面温度 ℃
- t_{sksw} : 温熱性発汗が始まる臨界平均皮膚表面温度 ℃
- V_{op} : 作用風速 m/s
- w_{crit} : 無効発汗が発生し始める臨界発汗濡れ率 ND
- w_{eff} : 有効発汗による濡れ率(有効濡れ率) $\{=(q_{sw} - q_{dr})/q_{max}\}$ ND
- w_{sw} : 発汗による濡れ率 $(=q_{sw}/q_{max})$ ND
- ξ : 外部機械仕事率 $(=q_{wk}/q_M)$ ND
- η_{sw} : 有効発汗率 $\{=(q_{sw} - q_{dr})/q_{sw}\}$ ND

3. 人体表面からの発汗熱流密度 q_{sw} の特性とその適用範囲

人体表面からの発汗熱流密度(以下、熱流密度を省略) q_{sw} を、運動性発汗 q_{swe} と温熱性発汗 q_{swt} に分けて考える。すなわち、

$$q_{sw} = q_{swe} + q_{swt} \tag{1}$$

まず、運動性発汗に関しては、代謝量が 1 met を越えると中立温感状態でも発汗することが知られており、本論文ではこれを運動性発汗 q_{swe} と称することに¹⁾するが、その値は次式で表される¹⁾。

$$q_{swe} = 0.42(q_H - 58.14) \tag{2}$$

一方、温熱性の発汗 q_{swt} は平均皮温がある臨界値 t_{sksw} を越えると発生する。この発汗は、平均皮温の範囲を限定すれば、平均皮温 t_{sk} の臨界平均皮温 t_{sksw} からの偏差 $(=t_{sk} - t_{sksw})$ に一次比例するとみなすことができる^{21, 22)}。この特性を適用できる上限の平均皮温 t_{skcr} は、代謝量によっても異なるが 36℃前後である²⁵⁾。この平均皮温 t_{skcr} より低い温域 $(t_{sksw} < t_{sk} \leq t_{skcr})$ における体内温度の変化は、平均皮温の変化と比べると小さくほぼ一定とみなすことができる。この温域の温熱性発汗特性 q_{swt} を q_{swsk} と表わす。

$$q_{swsk} = k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw}) \quad (t_{sksw} < t_{sk} \leq t_{skcr}) \tag{3}$$

本論文では、この温域 $(t_{sksw} < t_{sk} \leq t_{skcr})$ を扱う。

因みに、この平均皮温 t_{skcr} を越える温域 $(t_{sk} > t_{skcr})$ においては、本論文で対象とする定常状態に近い状態では、体内温度が平均皮温とほぼ同じ割合で上昇する。その結果、体内温度の上昇に起因する温熱性発汗 q_{swcr} によって発汗は急増する^{25, 26, 27)}。

4. 有効発汗率 η_{sw} の近似特性式と有効発汗密度 q_{swev}

発汗温域において、次式で定義される発汗による濡れ率 w_{sw} (以後、発汗濡れ率) が臨界値を越えると、汗の一部が体表面で蒸発しないで滴り落ちる現象が生ずる。

$$w_{sw} = q_{sw} / q_{max} \tag{4}$$

ここで、 q_{max} は濡れた人体表面からの蒸発熱流密度で、次式で表される。

$$q_{max} = k_{max} (p_{sk} - p_a) \tag{5}$$

上式を用いると、発汗濡れ率 w_{sw} は次式のようにあらわされる。

$$\therefore w_{sw} = \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} / \{k_{max} (p_{sk} - p_a)\} \tag{6}$$

体を冷やさずに失われる無効発汗の等価蒸発熱流密度を q_{dr} とおくと、人体表面で蒸発して体を冷やすことに寄与する汗の量、すなわち、有効発汗熱流密度(以後、有効発汗) q_{swev} は次式で表される。

$$q_{swev} = q_{sw} - q_{dr} \tag{7}$$

また、有効発汗率 η_{sw} は次の式(8)で定義される^{2, 3)}。

$$\begin{aligned} \eta_{sw} &= q_{swev} / q_{sw} \\ &= (q_{sw} - q_{dr}) / q_{sw} \end{aligned} \tag{8}$$

この関係を用いると、有効発汗 q_{swev} は次式のように表される。

$$q_{swev} = q_{sw} \eta_{sw} \tag{9}$$

また、無効発汗が始まる発汗濡れ率(以後、臨界濡れ率)を w_{crit} とすると、発汗濡れ率 w_{sw} がこの値を越える温域 $(w_{sw} > w_{crit})$ における実質的な濡れ率 w_{eff} (以後、有効濡れ率)は次式で表される(計算上 $w_{eff} \geq 1$ のときは、全身が濡れていることを意味する)。

$$\begin{aligned} w_{eff} &= (q_{sw} - q_{dr}) / q_{max} \\ &= w_{sw} \eta_{sw} \quad (w_{sw} > w_{crit}) \end{aligned} \tag{10}$$

さて、既往の研究^{2~4)}では、図1~3に示すように、有効発汗率 η_{sw} は有効濡れ率 w_{eff} に対して整理されている。図1と2はうつ伏せの姿勢に関する結果^{2, 3)}で、図3は自転車エルゴメーターで得られたものである⁴⁾。本論文ではこれらの結果を参考にして、同図に曲線で示したように、有効発汗率 η_{sw} を次式のように発汗濡れ率 w_{sw} の関数で近似する^{注2)}。

$$\eta_{sw} = a_{dr} + b_{dr} / w_{sw} \tag{11}$$

図1~3に示す曲線は、筆者らが新たに導いた近似式の曲線である。有効発汗率 η_{sw} を上式の形で近似することにより、後述の式(18)に示すように、有効発汗 q_{swev} を近似的に平均皮温の一次式で表わすことが可能になる。その結果、次節で論ずるように、平均皮温を環境諸要素の陽関数で表わすことが可能になる。この特性式を利用すると、臨界濡れ率 w_{crit} は次のように表される。

$$w_{crit} = b_{dr} / (1 - a_{dr}) \tag{12}$$

因みに η_{sw} を有効濡れ率 w_{eff} の関数として表示すると次式のようになる。

$$\eta_{sw} = a_{dr} w_{eff} / (w_{eff} - b_{dr}) \tag{13}$$

近似式の係数 a_{dr} , b_{dr} と w_{crit} を表.1に示す。

表.1 有効発汗率 η_{sw} の近似式の係数

	風速 m/s	a_{dr}	b_{dr}	w_{crit}	文献
うつぶせ	0.2	0.358	0.483	0.752	2)
うつぶせ	0.6 & 0.9	0.387	0.397	0.648	3)
エルゴメーター	静穏	0.371	0.305	0.485	4)

これまでに知られている臨界濡れ率 w_{crit} の値は、静穏環境における椅座時の場合については 0.8 前後²⁸⁾、また、筆者らが自転車エルゴメータを用いた実験²⁹⁾では 0.5 のあたりであった。上記の結果とほぼ対応している。発汗がしたり落ちるのは物理現象であり、「うつぶせ」と「エルゴメーター」で本質的な違いがあるわけではないことを考慮すると、この臨界濡れ率の差は、発汗の様相が両者で異なることが原因と考えられる。「エルゴメーター」実験において、臨界濡れ率近域の発汗の様子を観察すると、発汗は主に上半身で起こり、したり落ちる汗も上半身に限られる。運動している大腿等の下半身は視覚的にはほとんど発汗していないように見える。このことから、少なくとも無効発汗が生じ始める臨界濡れ率が両者で異なるのは、この発汗の部位差が主な要因と考えられる。「エルゴメ

「ター」の臨界濡れ率 0.485 は、「うつぶせ」の臨界濡れ率 0.752 の 65% であるが、「うつぶせ」の発汗がほぼ全身的に起こると考えると、この 65% は上記の観察で「エルゴメータ」の発汗が集中する上半身の皮膚表面積の全身に対する比にほぼ対応する。すなわち、汗が滴り始める部位の局所的発汗濡れ率は、両者でほぼ等しいことになる。

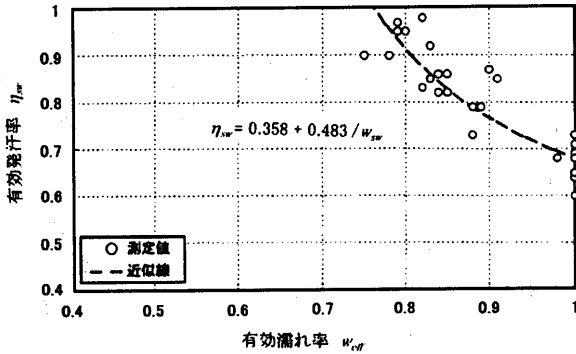


図1 有効発汗率 η_{sw} vs. 有効濡れ率 w_{eff}
(0 clo, 約 1 met, 0.2 m/s)²⁾

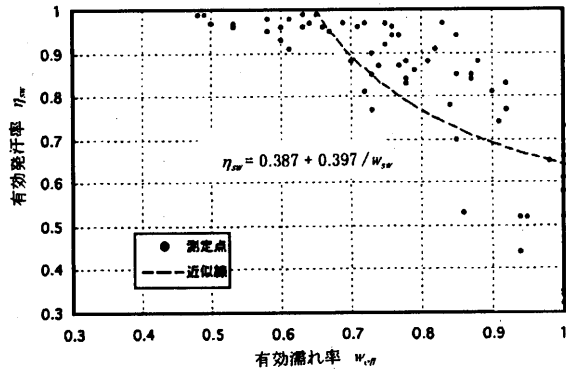


図2 有効発汗率 η_{sw} vs. 有効濡れ率 w_{eff}
(0 clo, 約 1 met, 0.6 & 0.9 m/s)³⁾

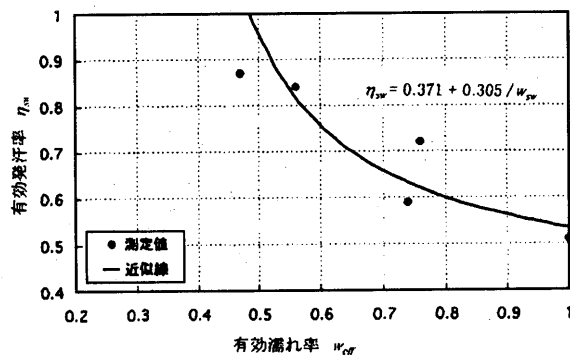


図3 有効発汗率 η_{sw} vs. 有効濡れ率 w_{eff}
(0 clo, 約 4.5 met, 0.2 m/s)⁴⁾

さて、式(12)を式(9)に適用すると、有効発汗 q_{swev} は次式で表わすことができる。

$$q_{swev} = a_{dr} q_{sw} + b_{dr} q_{max} \quad (15)$$

$$= a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} + b_{dr} k_{max} (p_{sk} - p_a) \quad (16)$$

ここで、平均皮温 t_{sk} における飽和水蒸気圧 p_{sk} を、温度範囲を限定して平均皮温 t_{sk} の一次式で近似する。すなわち、

$$p_{sk} = a_{sk} t_{sk} + b_{sk} \quad (17)$$

この関係を式(16)に入れることにより q_{swev} を平均皮温の関数で表わすことができる。

$$q_{swev} = a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} + b_{dr} k_{max} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) \quad (18)$$

また、式(11)に示す有効濡れ率 w_{eff} は次式で表される。

$$w_{eff} = a_{dr} w_{sw} + b_{dr} \quad (w_{sw} > w_{crit}) \quad (19)$$

$$= a_{dr} q_{sw} / q_{max} + b_{dr} \quad (20)$$

$$\therefore w_{eff} = a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} / \{k_{max} (p_{sk} - p_a)\} + b_{dr} \quad (21)$$

$$= a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} / \{k_{max} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a)\} + b_{dr} \quad (22)$$

全身が濡れる $w_{eff} = 1$ の時の発汗濡れ率 w_{sw} は次式で表わされる。

$$w_{sw} = (1 - b_{dr}) / a_{dr} \quad (w_{sw} > w_{crit}) \quad (23)$$

一方、拡散による蒸発熱流密度 (以後、拡散蒸発) q_{dif} は次式で表される。

$$q_{dif} = k_{dif} (p_{sk} - p_a) (1 - w_{eff}) \quad (24)$$

ここに、式(6)、(11)、(12)、(22)を適用して、次式が得られる。

$$q_{dif} = k_{dif} (p_{sk} - p_a) (1 - b_{dr} - a_{dr} q_{sw} / q_{max}) \quad (25)$$

$$= k_{dif} (p_{sk} - p_a) (1 - b_{dr}) - a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} k_{dif} / k_{max} \quad (26)$$

$$= k_{dif} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) (1 - b_{dr}) - a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} k_{dif} / k_{max} \quad (27)$$

5. 無効発汗温域における平均皮温の予測 ($t_{sksw} < t_{sk} \leq t_{skcr}$)

5.1 熱平衡式

人体に関する定常状態における熱平衡式として、Fanger が中立温感時の式を提示している¹⁾。本論文ではこの式に、温熱性発汗 q_{swt} と有効発汗率 η_{sw} を加え、さらに、屋外環境での評価を考慮して短波長放射熱流密度 q_{sun} を導入して次式のように表す。

$$q_M (1 - \xi) = q_H = q_{sres} + q_{Lres} + q_{dif} + (q_{swe} + q_{swt}) \eta_{sw} + q_r + q_c - q_{sun} \quad (28)$$

5.2 無効発汗の有無の判定

— $\eta_{sw} = 1$ として算定した w_{sw} と w_{crit} との比較 —

まず、有効発汗率 η_{sw} を 1、すなわち無効発汗がないものと仮定して発汗濡れ率 w_{sw} を算定する。その値が臨界濡れ率 w_{crit} よりも大きい場合に無効発汗が発生することになるが、無効発汗発生時の平均皮温は 5.3 と 5.4 節の式を用いて算出される。

さて、 $\eta_{sw} = 1$ のときの平均皮温と発汗濡れ率 w_{sw} は、既報^{21, 22)}で報告したように下記のように導かれる。

まず、熱平衡式(28)において平均皮温を含むのは q_{dif} 、 q_{swt} 、 q_r 、 q_c の 4 項である。 q_r と q_c は次のように表される。

$$q_r + q_c = k_{rc} (t_{sk} - t_{op}) \quad (29)$$

温熱性発汗 q_{swsk} に対しては式(3)を適用する。

$$q_{swsk} = k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw}) \quad (30)$$

q_{dif} は次式のように表される ($\eta_{sw} = 1$)。

$$q_{dif} = (1 - w_{sw}) k_{dif} (p_{sk} - p_a) = (1 - q_{sw} / q_{max}) k_{dif} (p_{sk} - p_a) \quad (31)$$

q_{max} に関する式(5)を適用して次式を得る。

$$\therefore q_{dif} = k_{dif} (p_{sk} - p_a) - (k_{dif} / k_{max}) \{k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw}) + q_{swe}\} \quad (32)$$

さらに、平均皮温 t_{sk} における飽和水蒸気圧 p_{sk} に関して、平均皮温 t_{sk} の一次式で近似した式(17)を適用して次式が得られる。

$$\begin{aligned} \therefore q_{dif} &= k_{dif} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) \\ &\quad - (k_{dif} / k_{max}) k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw}) + q_{swe} \end{aligned} \quad (33)$$

これらの式(29)、(30)、(33)から、上記の4項 q_{dif} 、 q_{swsk} 、 q_r 、 q_c は全て平均皮温 t_{sk} の一次式で表されることになり、結局 $w_{sw} = 1$ とき、すなわち発汗による濡れ率 w_{sw} が $w_{sw} \leq w_{crit}$ のときの平均皮温は、上記の熱平衡式(28)から次のように得られる。

$$\begin{aligned} t_{sk} &= [q_{Hf} - \{q_{sres} + q_{Lres} - q_{sun} + k_{dif} (b_{sk} - p_a) + q_{swe} (1 - k_{dif} / k_{max}) \\ &\quad - k_{swsk} (1 - k_{dif} / k_{max}) t_{sksw} - k_{rc} t_{op}\}] \\ &\quad / \{a_{sk} k_{dif} + k_{swsk} (1 - k_{dif} / k_{max}) + k_{rc}\} \quad (w_{sw} \leq w_{crit}) \end{aligned} \quad (34)$$

この結果を利用して、発汗濡れ率は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} w_{sw} &= q_{sw} / q_{max} \\ &= (q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})) / (k_{max} (p_{sk} - p_a)) \end{aligned} \quad (35)$$

この w_{sw} が臨界濡れ率 w_{crit} より大きい時、無効発汗が発生する。さらに、 w_{sw} が式(23)で示される値、

$$w_{sw} \geq (1 - b_{dr}) / a_{dr}$$

を越えると全身が濡れた状態になる ($w_{eff} \geq 1$)。

5.3 無効発汗が発生する温域 ($w_{sw} > w_{crit}$) における平均皮温

上記の計算で得られた発汗濡れ率が $w_{sw} > w_{crit}$ のとき、前述したように無効発汗が発生する。この温域における人体表面からの有効発汗 q_{swev} は式(18)で表される。平均皮温 t_{sk} に着目して整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} q_{swev} &= a_{dr} (q_{swe} - k_{swsk} t_{sksw}) + b_{dr} k_{max} (b_{sk} - p_a) \\ &\quad + (a_{dr} k_{swsk} + a_{sk} b_{dr} k_{max}) t_{sk} \end{aligned} \quad (36)$$

また、拡散による蒸発は、式(27)を t_{sk} について整理して次式で表わす。

$$\begin{aligned} q_{dif} &= k_{dif} (b_{sk} - p_a) (1 - b_{dr}) - a_{dr} (q_{swe} - k_{swsk} t_{sksw}) k_{dif} / k_{max} \\ &\quad + \{a_{sk} (1 - b_{dr}) k_{dif} - a_{dr} k_{swsk} k_{dif} / k_{max}\} t_{sk} \end{aligned} \quad (37)$$

結局、温域が $w_{sw} \geq w_{crit}$ のときの平均皮温は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} t_{sk} &= [q_{Hf} - \{q_{sres} + q_{Lres} - q_{sun} + (k_{dif} (1 - b_{dr}) + b_{dr} k_{max}) (b_{sk} - p_a) \\ &\quad + a_{dr} (q_{swe} - k_{swsk} t_{sksw}) (1 - k_{dif} / k_{max}) - k_{rc} t_{op}\}] \\ &\quad / \{a_{sk} (1 - b_{dr}) k_{dif} + a_{dr} k_{swsk} (1 - k_{dif} / k_{max}) + a_{sk} b_{dr} k_{max} + k_{rc}\} \end{aligned} \quad (38)$$

この温域の有効濡れ率は、式(22)で与えられる。

$$w_{eff} = a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} / (k_{max} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a)) + b_{dr} \quad (22)$$

5.4 全身が濡れる温域 ($w_{eff} \geq 1$) における平均皮温

全身が濡れた状態、すなわち、 $w_{eff} \geq 1$ または $w_{sw} \geq (1 - b_{dr}) / a_{dr}$ における、人体表面からの蒸発は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} q_{swev} &= q_{max} \\ &= k_{max} (p_{sk} - p_a) \end{aligned} \quad (7)$$

$$= k_{max} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) \quad (39)$$

$$q_{dif} = 0 \quad (40)$$

$$\begin{aligned} t_{sk} &= [q_{Hf} - \{q_{sres} + q_{Lres} - q_{sun} + k_{max} (b_{sk} - p_a) - k_{rc} t_{op}\}] / (a_{sk} k_{max} + k_{rc}) \\ &\quad (w_{eff} \geq 1) \end{aligned} \quad (41)$$

無効発汗は、次式で表わされる。

$$q_{dr} = q_{swe} + q_{swsk} - q_{max} \quad (42)$$

$$= q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw}) - k_{max} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a) \quad (43)$$

6. 平均皮温と有効濡れ率の計算例

計算例を空気線図上に示したのが図4 (1 met)^{注3)}、図5 (4.5 met)である。平均皮温は式(34)、(38)、(41)を用いて算定した。

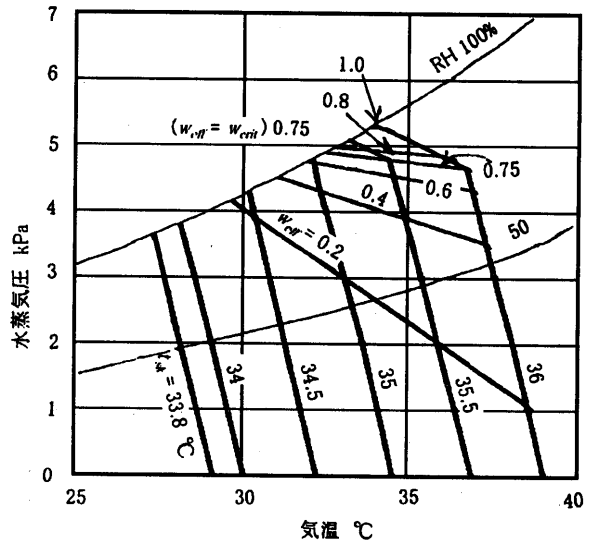


図4 空気線図上に表した等平均皮温線と等発汗(有効)濡れ率線

(1 met, 0 clo, 0.1 m/s, $t_a = t_{rop}$)

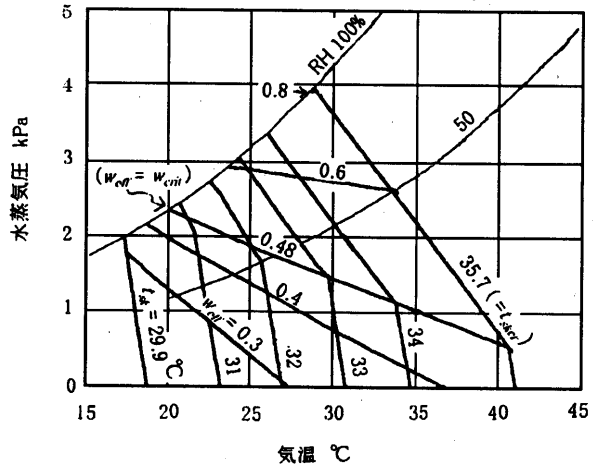


図5 空気線図上に表した等平均皮温線と等発汗(有効)濡れ率線

(4.5 met, 0 clo, 0.2 m/s, $t_a = t_{rop}$)

図4の例 (1 met, 0 clo, 0.1 m/s, $t_a = t_{rop}$) では、臨界濡れ率 w_{crit} が0.75であり、無効発汗は5 kPa 近くの高い水蒸気圧で発生している。この無効発汗域では、有効濡れ率が水蒸気圧に強く依存するなど、湿度が人体に強い影響を与えることがよみ取れる。なお、本論文では、代謝量 1 met の場合、平均皮温算定式の適用限界 t_{skcr} を36°Cとした²⁵⁾。この平均皮温を越えると、体内温度が平均皮温と同じ割合で上昇し、人体への負担が急増することが予想される。

一方、図5の場合 (4.5 met, 0 clo, 0.2 m/s, $t_a = t_{rop}$)、臨界濡れ率は約0.5であり、気温が20°Cを前後で早くも無効発汗が生じていることが分かる。この例のように代謝量が大い場合は特に、有効発汗率を考慮することが環境評価に不可欠であることが理解できる。なお、代謝量が4.5 met のときの適用限界平均皮温 t_{skcr} を35.7°Cとした²⁵⁾。

ここで、諸式の計算には下記の特性を適用した^{20, 28)}。

$$q_{sres} = k_{sres} (t_{ex} - t_a) = 0.0014 q_M (34.0 - t_a) \quad (44)$$

$$q_{Lres} = k_{Lres} (p_{ex} - p_a) = 0.0173 q_M (5.87 - p_a) \quad (45)$$

$$a_{sk} = 0.270, b_{sk} = -3.83 \quad (46)$$

(27 < t_{sk} < 37°C, 5Met 程度以下で適用可能。誤差数%以内)

$$k_{dif} = 1/(R_{dif} + R_{se})$$

$$= 1/(0.328 + 1/(LR \cdot h_c)) \quad (47)$$

$$h_c = 12.1 v_{op}^{0.5} \quad (48)^{33)}$$

$$k_{swt} = k_{swsk} = 28 k_{adp} \quad (49)^{21, 22)}$$

$$k_{adp} = 1 \quad (50)$$

$$k_{max} = LR \cdot h_c \quad (51)$$

$$k_{dif}/k_{max} = 1/(0.328 LR \cdot h_c + 1) \quad (52)$$

$$k_{rc} = h_c + h_{rop} \quad (53)$$

$$t_{sksw} = 33.8 \quad (1 - 1.2 \text{ met}) \quad (54)^{21)}$$

$$t_{sksw} = t_{skn} = 34.1 - 0.0275 (q_{Hf} - 58.14)$$

$$(1.2 \text{ met 以上}) \quad (55)$$

$$t_{op} = (h_c t_s + h_{rop} t_{rop}) / (h_c + h_{rop}) \quad (56)^{34)}$$

$$h_{rop} = 4 \epsilon \sigma \{273.2 + (t_s + t_{rop})/2\}^3 \cdot f_{eff} \quad W/(m^2 \cdot K) \quad (57)$$

ϵ :放射率, σ :Stefan-Boltzmann 定数

7. 結言

暑熱環境を評価するための簡便な指標を構築することを目的として、有効発汗率(無効発汗)を考慮した暑熱環境における人体の平均皮温の予測式を提示した。まず、既往のデータを基にして、有効発汗率を発汗濡れ率の関数で表した。ついで、この特性と既報^{21, 22)}で提示した温熱性発汗特性とを人体の熱平衡式に統合して適用することにより、無効発汗に関する3つの状態、すなわち、(1)無効発汗なし($w_{sw} \leq w_{crit}$)、(2)無効発汗あり($w_{crit} < w_{eff} < 1$)、(3)全身が濡れている状態($w_{eff} \geq 1$)、における平均皮温予測式を下記のように導いた。

(1) 無効発汗なし ($w_{sw} \leq w_{crit}$)

$$t_{sk} = [q_{Hf} - \{q_{sres} + q_{Lres} - q_{sun} + k_{dif} (b_{sk} - p_a) + q_{swe} (1 - k_{dif}/k_{max}) - k_{swsk} (1 - k_{dif}/k_{max}) t_{sksw} - k_{rc} t_{op}\}] / \{a_{sk} k_{dif} + k_{swsk} (1 - k_{dif}/k_{max}) + k_{rc}\} \quad (w_{sw} \leq w_{crit}) \quad (34)$$

この結果を利用して、発汗による濡れ率は次式のように得られる。

$$w_{sw} = q_{sw} / q_{max}$$

$$= \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} / \{k_{max} (p_{sk} - p_a)\} \quad (35)$$

この w_{sw} が臨界濡れ率 w_{crit} より大きい時、無効発汗が発生する。

(2) 無効発汗あり ($w_{crit} < w_{eff} < 1$)

$$t_{sk} = [q_{Hf} - \{q_{sres} + q_{Lres} - q_{sun} + (k_{dif} (1 - b_{dr}) + b_{dr} k_{max}) (b_{sk} - p_a) + a_{dr} (q_{swe} - k_{swsk} t_{sksw}) (1 - k_{dif}/k_{max}) - k_{rc} t_{op}\}] / \{a_{sk} (1 - b_{dr}) k_{dif} + a_{dr} k_{swsk} (1 - k_{dif}/k_{max}) + a_{sk} b_{dr} k_{max} + k_{rc}\} \quad (38)$$

この温域の有効濡れ率は、次式で与えられる。

$$w_{eff} = a_{dr} \{q_{swe} + k_{swsk} (t_{sk} - t_{sksw})\} / \{k_{max} (a_{sk} t_{sk} + b_{sk} - p_a)\} + b_{dr} \quad (22)$$

(3) 全身が濡れ ($w_{eff} \geq 1$)

$$t_{sk} = [q_{Hf} - \{q_{sres} + q_{Lres} - q_{sun} + k_{max} (b_{sk} - p_a) - k_{rc} t_{op}\}] / \{a_{sk} k_{max} + k_{rc}\} \quad (w_{eff} \geq 1) \quad (41)$$

これらの予測式を用いて椅子時と運動時(自転車エルゴメータ)における平均皮温を計算し、空気線図上に示すことにより、暑熱環境下では無効発汗の影響を無視できないことを明らかにした。

なお、本論文で適用した有効発汗率の特性は、限られた実験条件で得られた結果を基にしたものであり、また、着衣の影響も考慮されていない。これらは今後の課題である。

謝辞

御議論いただいた持田教授(北海道大学)と同研究室の諸氏に謝意を表わします。

注

1) 本論文では既報^{21, 22)}と同様、暑い環境下での運動時の発汗にはこの「運動性発汗」(暑さに起因しない発汗)が含まれているとして、この「暑さに起因しない発汗」を超えた発汗を「温熱性発汗」としている。すなわち、式(1)と(2)で運動時の温熱性発汗を定義している。

2) 式(12)の導出:

この式は、次のような方法で筆者らが新たに導いたものである。

まず、図1~3の実測データを基にして、有効発汗率 η_{sw} を有効濡れ率 w_{eff} の一次式で近似する。ただし、 $w_{crit} < w_{eff} < 1$ の範囲。

$$\eta_{sw} = a w_{eff} + b \quad (A1)$$

ここで、 a 、 b :定数

一方、 η_{sw} と w_{eff} との間に、定義から、次の関係がある。

$$w_{eff} = w_{sw} \zeta_{sw} \quad (A2)$$

式(A1)と(A2)から、 η_{sw} に関する次の関係が得られる。

$$\eta_{sw} = b / (1 - a w_{sw}) \quad (A3)$$

これを式(A2)に入れて、次式を得る。

$$w_{eff} = w_{sw} b / (1 - a w_{sw}) \quad (A4)$$

この式を用いて、 $w_{crit} < w_{eff} < 1$ の範囲で、 w_{eff} を w_{sw} の一次式で近似する。

$$w_{eff} = a_{dr} w_{sw} + b_{dr} \quad (A5)$$

これを式(A2)に入れて次式、すなわち、本文の式(12)を得る。

$$\eta_{sw} = a_{dr} + b_{dr} / w_{sw} \quad (A6)$$

3) 図4は、基本的な状態(1 met, 0 clo, 0.1 m/s)における無効発汗の影響を概観する目的で、有効発汗率の近似値として図1の図中に示す近似式 $\eta = 0.358 + 0.483 / w_{sw}$ を用いて計算したものである。0.75 は $\eta = 1$ となる臨界発汗濡れ率 (w_{crit}) である。

参考文献

- 1) Fanger, P. O., Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation, ASHRAE Trans, Vol.73 (Part II), pp. III 4.1 - III 4.20, 1967
- 2) Candas, V., J. P.Libert, J. J. Vogt: Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating, J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol., 46(3), 522-528, 1979
- 3) Candas, V., J. P.Libert, J. J. Vogt: Influence of air velocity and heat acclimation on human skin wettedness and sweating efficiency, J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol., 47(6), 1194-1200, 1979
- 4) Alber-Wallerstrom, B., I. Holmer: Efficiency of sweat evaporation in unacclimatized man working in a hot humid environment, Eur J. Appl. Physiol., 54, 480-487, 1985
- 5) ISO 7243: 1989, Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)
- 6) Houghten, F. C., Yaglou, C. P., Determining lines of equal comfort, ASHVE J., 28, 163-176, 361-384, 1923
- 7) McArdle, B., Dunham, W., et al., The prediction of the physiological effects of warm and hot environments, Rept. R.N.P. 47/391, Medical Research Council, London, 1947
- 8) Belding, H. S., Hatch, T. F., Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains, Heating, Piping & Air Conditioning, August, 129-136, 1955

- 9) ISO 7933:1989, Hot environments . Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate
- 10) Malchaire, J., Piette, A., et al, Development and validation of the predicted heat strain model, *Ann. occup. Hyg.*, Vol.45, No.2, 123-135, 2001
- 11) Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y., An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Trans.*, Vol.77(Part I). 247-262, 1971
- 12) Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, L.G., A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Trans.* Vol.92, Part II b. 709-731, 1986
- 13) 真木学, 窪田英樹, 松尾朋浩, 竹内崇, 運動時における発汗特性と平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)D-2, 385-386, 1997.9
- 14) 持田 徹, 新有効温度 ET*の成果と問題点, 日本生気象学会雑誌, Vol.29, No.3, 163, 1992
- 15) 深井一夫, 斎藤純司, 伊藤 宏, 後藤 滋, 代謝量の異なる場合の標準新有効温度(SET*)と温熱感覚の関係一歩行時と椅座安静時の比較一, 空気調和・衛生工学会論文集, No.55, 99-108, 1993
- 16) 佐古井智紀, 持田徹, 長野克則, 島倉一実, 堅田兼史; 平均皮膚温・濡れ面積率と等温感線の形状, 空気調和・衛生工学会論文集, No.79, 11-17, 2000
- 17) 持田徹, L.G.Berglund, 堅田兼史, 佐古井智紀, 長野克則, 島倉一実, 吉野博; 暑熱領域における温熱感に及ぼす湿度の影響, 空気調和・衛生工学会論文集, No.72, 67-74, 1999
- 18) 堀越哲美, PMV と快適方程式の検討, 空気調和・衛生工学, Vol.60, No.10, 13-19, 1986
- 19) 西 安信, PMV の成果と問題点, 日本生気象学会雑誌, Vol.29, No.3, 164, 1992
- 20) Fanger P.O.: *Thermal Comfort*, McGraw Hill Book Company, New York, 1972
- 21) 窪田英樹, 松尾朋浩他: 温熱性発汗特性を考慮した椅座時の平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会計画系論文集, No.532, 79-85, 2000.6
- 22) 松尾朋浩, 窪田英樹他: 運動時の温熱性発汗特性と平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会計画系論文集 No.526, 107-113, 1999.12
- 23) Benzinger, T. H., Heat regulation Homeostasis of central temperature in man, *Physiological reviews*, Vol.49, No.4, 671-759, Oct. 1969
- 24) Nadel, E.R., Bullard, R. W., Stolwijk, J. A. J., Importance of skin temperature in the regulation of sweating, *J. of Applied Physiology*, Vol.31, No.1, 80-87, July 1971
- 25) 窪田英樹他: 暑熱環境における人体内部温度の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)D-2, 367-368, 1999.9
- 26) 池上晴夫, 運動処方, 朝倉書店, p.67
- 27) Robinson, Sid, et al., Physiologically equivalent conditions air temperature and humidity, *Am. J. Physiol.*, 143,21-32, 1945
- 28) ASHRAE FUNDAMENTALS HANDBOOK, Chapter 8.12, 1997
- 29) 窪田英樹, 松尾朋浩, 真木学他, 運動時の発汗特性と平均皮膚温予測モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)D-1, 715-716, 1998.9
- 30) Nishi, Y., Gagge, A. P., Moisture permeation of clothing - a factor governing thermal equilibrium and comfort, *AHRAE Trans.*, Vol.76, Part1, 137-145, 1970
- 31) Oohori, T., Berglund, L. G., Gagge, A. P., Comparison of current two-parameters indices of vapor permeation of clothing - as factors governing thermal equilibrium and human comfort, *ASHRAE Trans.*, Vol.91, Part2A, 85-101, 1984
- 32) McClough, E. A., Jones, B. W., Tamura, T., A data base for determining the evaporative resistance of clothing, *AHRAE Trans.*, Vol. 95(2), 316-328, 1989
- 33) Winslow, C. -E., Gagge, A. p., Herrington, B. P., The influence of air movement upon heat loss from the clothed human body, *Journal of Physiology*, 127, 505-518, 1939
- 34) Winslow, C. -E. A., Herrington, L. P., Gagge, A. P., Physiological reaction of the human body to varying environmental temperature, *The American Journal of Physiology*, Vol.120, No.1, 1-22, 1937
- 35) 松尾朋浩, 窪田英樹, 鎌田紀彦, 若松伸司, 暑熱環境における湿度感に関する基礎的実験, 日本建築学会計画系論文集, 第 532 号, 15-21, 2000.6

(2003年1月17日原稿受理, 2003年10月24日採用決定)